

Formación de Imágenes 3D de Reflectividad Radar en Campo Próximo con Geometría de Exploración Esférica

R. Checa, A. Broquetas, J. Palau, L. Jofre

Departamento TSC, Grupo AMR, ETS Ingenieros de Telecomunicación Barcelona, UPC
Campus Nord UPC, Edificio D3, Apartado Postal 30002, 08071 Barcelona

Tel: 93-4016819, Fax: 93-4017232, e-mail: palau@voltor.upc.es

Abstract.- This document presents an algorithm for the reconstruction of 3D radar reflectivity images using spherical-wave ISAR techniques. The target is illuminated with an spherical wave and near-field backscatterig measurements are obtained using an spherical exploration geometry. The solution proposed by this method is described and the results of some simulations are shown for its validation.

1.- Introducción

La obtención de imágenes de reflectividad radar es una herramienta de gran interés para el modelado y simulación de blancos radar. Estas imágenes permiten el estudio de blancos complejos, localizando sus centros de eco dominantes, y, a su vez, aportan una información útil para mejorar la comprensión de los mecanismos de dispersión.

Las técnicas de radar de apertura sintética inversa (ISAR) [1] proporcionan los métodos de medida necesarios para llevar a la práctica los algoritmos de reconstrucción de imágenes.

Las técnicas clásicas, conocidas con el nombre de PWISAR (ISAR de onda plana) [2] iluminan el blanco con un frente de onda localmente plano. Para conseguir esta iluminación una primera solución sería trabajar en campo lejano, pero esto se hace inviable a medida que las dimensiones eléctricas del blanco aumentan. Por ejemplo, para la obtención de la imagen de un blanco de 50 cm a la frecuencia de 10 GHz necesitaríamos realizar la medida en una cámara anecoica de una longitud superior a 17 m.

Otra posibilidad sería utilizar un sistema compacto ("compact range") [3] que consigue un frente de onda plano en campo cercano, pero para ello es necesario el uso de grandes reflectores, encareciendo considerablemente la implementación práctica del sistema que, además, necesita de un ajuste extremadamente preciso para garantizar un correcto funcionamiento.

A fin de superar todas estas dificultades se han desarrollado técnicas alternativas que nos permiten trabajar directamente en campo cercano. Son las técnicas SWISAR (ISAR de onda esférica) que, como su nombre indica, utilizan una iluminación del blanco con onda esférica, lo cual puede conseguirse de forma sencilla con antenas pequeñas y de baja directividad como las bocinas. No obstante, esta sencillez en el sistema de medidas requerirá de una mayor complejidad en el diseño de los algoritmos de reconstrucción.

Este documento se centra en el estudio de las técnicas SWISAR-3D adaptadas para un sistema de medida con una geometría de exploración esférica, como la existente en el European Microwave Signature Laboratory [4] del Joint Research Center (Ispra, Italia).

La formulación está basada en la técnica SWISAR-2D [5] y sus aspectos fundamentales serán expuestos a continuación.

2.- Geometría y formulación del método

El concepto de reflectividad radar nos da idea de la distorsión, en amplitud y fase, que experimenta una onda electromagnética al interaccionar con un blanco. Para un blanco complejo conviene definir una función de densidad espacial de reflectividad radar $\Psi(\vec{r}')$ que nos muestra la distribución de la reflectividad en todo el volumen ocupado por el blanco. Tendremos así la imagen 3D de reflectividad radar.

El sistema de exploración para la medida del campo reflejado se muestra en la Figura 1. El campo dispersado por el blanco es obtenido en función de 3 variables: la frecuencia de trabajo (f), el ángulo de rotación del blanco (φ) y el ángulo de desplazamiento en elevación de la sonda móvil de medida (θ). De este modo tendremos una matriz tridimensional con las componentes fase y cuadratura del campo reflejado $E_r(f, \theta, \varphi)$ cuya expresión, en función de la distribución de reflectividad del blanco, quedará del siguiente modo:

$$E_r = C_0 \int_V \Psi(\vec{r}') \frac{e^{-jk(R_1+R_2)}}{R_1 R_2} dV' \quad (1)$$

siendo R_1 y R_2 las distancias entre cada punto del blanco y las antenas emisoras y receptoras, respectivamente, y C_0 una constante que depende de los parámetros de la medida y que podrá ser eliminada mediante calibración.

Lo que pretendemos es realizar una operación de inversión de la ecuación (1) que nos permita pasar del dominio de la medida (f, θ, φ) al dominio espacial. Esta transformación podría plantearse de una forma exacta, lo cual podría convertirse en un trabajo realmente tedioso y que, en cualquier caso, no conduciría a una solución cerrada salvo en casos sencillos y particulares.

Lo que nosotros haremos será proponer una solución práctica basada en el diseño de una factor de inversión o focalizador ξ que nos permita obtener una buena aproximación ψ' de la reflectividad real del blanco a través de la siguiente operación de inversión

$$\Psi(r', \theta', \varphi') = \int_0^\infty \int_0^\pi \int_0^{2\pi} E_r(f, \theta, \varphi) \xi(f, \theta, \varphi, r', \theta', \varphi') df d\theta d\varphi \quad (2)$$

La misión de este focalizador consiste en compensar las variaciones de amplitud y fase que la onda electromagnética experimenta a lo largo del camino de propagación entre la antena emisora, el blanco y la antena receptora. Además, el dominio de la medida puede no ser el más idóneo para realizar directamente la operación de inversión; por ello al focalizador se le añadirá también un factor asociado al Jacobiano de la transformación del dominio de la medida a un dominio de variación lineal [6]. Con todo ello, la expresión del factor de focalización quedará como sigue

$$\xi(f, \theta, \varphi, r', \theta', \varphi') = \xi(f, \theta, r', \theta', \varphi' - \varphi) = R_1 R_2 e^{jk(R_1+R_2)} f^2 \sin\theta$$

donde R_1 y R_2 vienen dadas por:

$$R_1 = \sqrt{D_0^2 + r'^2 - 2D_0 r' (\sin\theta \sin\theta' \cos(\varphi' - \varphi) + \cos\theta \cos\theta')}$$

$$R_2 = \sqrt{D_0^2 + r'^2 - 2D_0 r' (\sin(\theta + \beta) \sin\theta' \cos(\varphi' - \varphi) + \cos(\theta + \beta) \cos\theta')}$$

siendo D_0 el radio de rotación de las antenas y β el ángulo biestático entre ellas.

Una cualidad interesante de la solución propuesta es su facilidad para adaptarse a posibles modificaciones en el sistema de medidas. De hecho, se han implementado diferentes versiones del algoritmo de reconstrucción para diversas variantes de la geometría (monoestática, biestática, desplazamiento de una o ambas antenas...) diseñando el factor de focalización adecuado para cada caso.

Asimismo, se ha incorporado un factor de corrección para los diagramas de radiación (amplitud y fase) de las antenas.

3.- Implementación

Para la realización práctica del proceso de reconstrucción se requiere una discretización de la operación de inversión dada por la ecuación (2), quedando de la forma

$$\psi(r', \theta', \varphi') = \sum_f \sum_{\theta} \sum_{\varphi} E_r(f, \theta, \varphi) \xi(f, \theta, r', \theta', \varphi' - \varphi)$$

La dependencia $\varphi' - \varphi$ convierte el sumatorio en la variable azimutal en una operación de convolución circular.

$$\psi(r', \theta', \varphi') = \sum_f \sum_{\theta} E_r(f, \theta, \varphi') * \xi(f, \theta, r', \theta', \varphi')$$

Podremos optimizar el tiempo de cálculo realizando una transformada discreta de Fourier (DFT) en la coordenada azimutal, convirtiendo la operación de convolución en un producto de transformadas. Además haremos uso de algoritmos óptimos de cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT).

$$\psi(r', \theta', \varphi') = FFT_{\varphi'}^{-1} \left\{ \sum_f \sum_{\theta} FFT_{\varphi} [E_r(f, \theta, \varphi')] \cdot FFT_{\varphi} [\xi(f, \theta, r', \theta', \varphi')] \right\}$$

La obtención de matrices tridimensionales nos obliga a disponer de una considerable cantidad de memoria (decenas de Mbytes) y a dedicar un elevado consumo de tiempo de CPU para el procesado realizado por los algoritmos de reconstrucción. Por este motivo se hace patente la necesidad de ajustar los criterios de muestreo de forma que permitan un correcto funcionamiento de los algoritmos, evitando problemas típicos de aliasing, pero que no ralenticen, con un sobremuestreo innecesario, el procesado de las imágenes. En nuestro caso hemos tomado como base el criterio de Nyquist y posteriormente, durante el proceso de simulación, ha sido ajustado en base a los resultados obtenidos.

Una vez obtenida la matriz 3D de reflectividad en coordenadas esféricas resulta conveniente realizar una transformación a coordenadas cartesianas para facilitar su visualización gráfica. Para ello se han implementado interpolaciones zero-padding y bilineal para obtener una imagen 3D en coordenadas cartesianas y con un buen grado de resolución.

Finalmente cabe reseñar que todos los algoritmos han sido programados de manera eficiente a fin de aprovechar las prestaciones de un supercomputador de la familia C3400 de CONVEX, una máquina vectorial y paralela perteneciente al CEPBA (Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona).

4.- Resultados

Se han realizado diversas simulaciones formadas por dispersores puntuales a fin de estudiar la respuesta impulsional del algoritmo y comprobar sus prestaciones para diferentes geometrías y parámetros de la medida (banda de trabajo, barridos en azimut y elevación...).

A continuación presentamos los resultados obtenidos para una configuración monoestática trabajando con un ancho de banda de 8 GHz (28 a 36 GHz), una rotación completa de 360° de los blancos y un barrido completo de 180° en elevación para la antena, la cual ha sido situada a 1 m del blanco.

La Figura 2 muestra la reconstrucción de 15 reflectores alineados sobre el eje x. La distancia entre reflectores es de 2.5 cm y todos presentan una reflectividad de valor unidad. La Figura 3 es un corte de la anterior sobre el eje que contiene los dispersores. En ella podemos observar la sensibilidad uniforme así como la quasi-invariancia de la respuesta impulsional.

Finalmente hemos realizado una reconstrucción 3D para corroborar la resolución obtenida en las tres direcciones del espacio. La Figura 4 muestra la disposición geométrica de la estructura simulada, la cual presenta un tamaño de $25 \times 25 \times 14$ cm y está formada por 7 reflectores con los siguientes valores de reflectividad: 2 en $z = -3.5$ cm; 1, 2, 3 y 4 en $z = 0$; 1 en $z = 3.5$ cm y 3 en $z = 7$ cm. La Figura 5 muestra una composición con cinco cortes en los anteriores planos z de la imagen 3D obtenida tras el proceso de reconstrucción.

5.- Conclusiones

Se ha desarrollado un algoritmo para la reconstrucción de la imagen 3D de reflectividad de blancos radar, utilizando una geometría de exploración esférica. La simetría que presenta este tipo de exploración ha permitido obtener una resolución vertical del orden de la horizontal, obteniéndose así una mejora considerable respecto a los resultados que proporciona una geometría de exploración cilíndrica.

Los tiempos de procesamiento de las imágenes tridimensionales son elevados pero, sin embargo, evitamos el uso de los costosos sistemas de campos compactos necesarios para las técnicas de onda plana. Además los algoritmos presentan una gran flexibilidad para adaptarse a posibles variaciones en la geometría e incorporar aspectos concretos del sistema de medida.

Referencias

- [1] D.L.Mensa, "High resolution radar imaging", 1984, Artech House, Dedham.
- [2] A.Broquetas, "A Compact system for RCS measurements and imaging up to 40 GHz", Nice 1990, Proceedings of Journées Internationales de Nice sur les Antennes (JINA-90), pp. 596-599.
- [3] R.C.Johnson, "Antenna range for providing a plane wave for antenna measurements", The microwave journal, pp. 47-54.
- [4] A.J.Sieber, "The European Microwave Signature Laboratory", EARSeL Advances in Remote Sensing, vol. 2, pp. 195-204, Enero 1993.
- [5] A.Broquetas, "A Near Field Spherical Wave Inverse Synthetic Aperture Radar Technique", IEEE AP-S International Symposium, vol II, pp. 114-117, Julio 1992.
- [6] J.E. Marsden, A.J.Tromba, Fondo Educativo Interamericano, 1981.

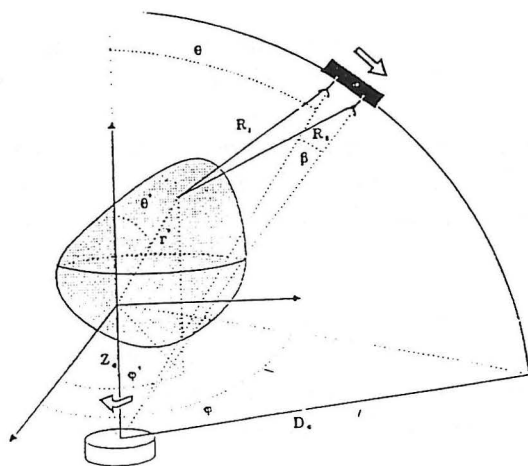


Figura 1 : Geometría de exploración esférica.

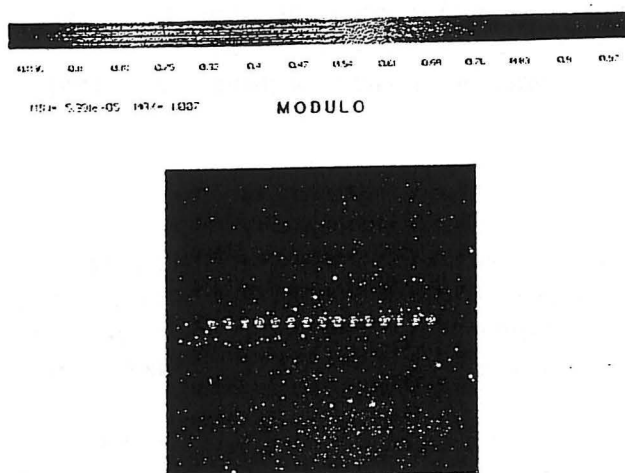


Figura 2 : Reconstrucción de 15 reflectores alineados.

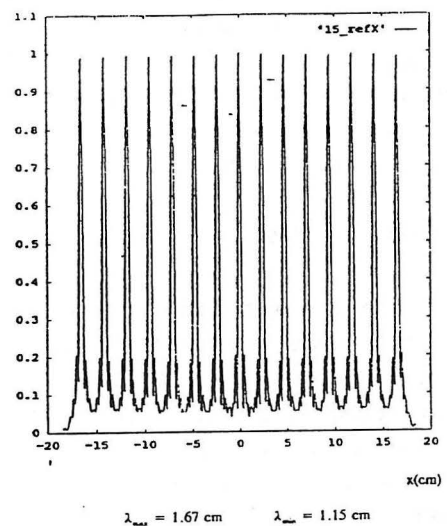


Figura 3 : Detalle de la respuesta impulsional.

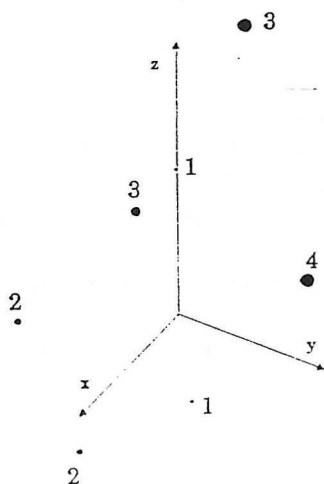


Figura 4 : Estructura 3D simulada.

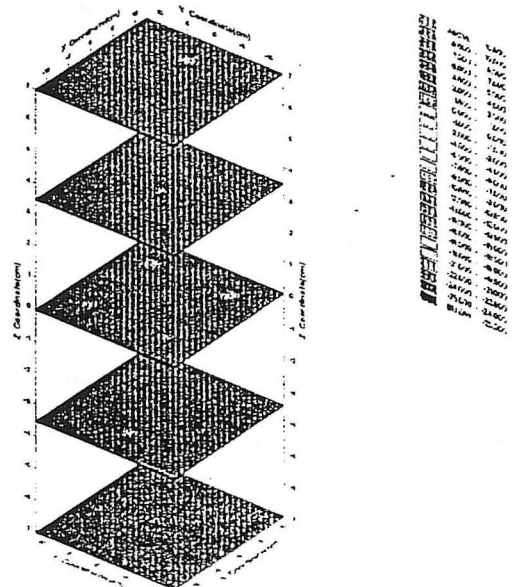


Figura 5 : Reconstrucción de la imagen 3D.